|  |  |
| --- | --- |
| **Asamblea de Radiocomunicaciones (AR-15)  Ginebra, 26-30 de octubre de 2015** |  |
| **UNIÓN INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES** |  |
|  |  |
| Origen: Documento 3/92(Rev.1)  Asunto: Cuestión UIT-R 201-5/3 | **Documento 3/1005-S** |
| **7 de septiembre de 2015** |
|  |

|  |
| --- |
| Comisión de Estudio 3 de Radiocomunicaciones |
| PROYECTO DE REVISIÓN DE LA RECOMENDACIÓN UIT-R P.834-6 |
| Efectos de la refracción troposférica sobre la  propagación de las ondas radioeléctricas |
|  |

Introducción

La Comisión de Estudio 3 propone la revisión de la Recomendación UIT-R [P.834-6](http://www.itu.int/rec/R-REC-P.834/es) relativa a la predicción de la longitud de trayecto efectiva, también definida como exceso de longitud del trayecto troposférico, en los trayectos Tierra-espacio.

Resumen de modificaciones

En el Capítulo 6 del Anexo 1, el título Longitud de trayecto de radio ficticio se ha cambiado por el de Exceso de longitud del trayecto radioeléctrico para armonizarlo con el texto de la Recomendación, además otros cambios de edición en este mismo capítulo.

El modelo de ecuación (2) especificado de la página 7 a la 8 se ha actualizado con la inserción de:

– un nuevo coeficiente de refracción (k2);

– funciones de correspondencia independientes;

– corrección de componente seco por hidrostático;

– corrección de la constante de gravedad en la ecuación (23e);

– inclusión de los parámetros del modelo como parte integral de la Recomendación;

– definición del procedimiento de interpolación que se utilizará a lo largo del trayecto horizontal y en altura.

Palabras clave

Exceso de longitud del trayecto troposférico, enlace Tierra-espacio, GNSS, productos meteorólogicos numéricos, mapas digitales.

PROYECTO DE REVISIÓN DE LA RECOMENDACIÓN UIT-R P.834-6

Efectos de la refracción troposférica sobre la propagación  
de las ondas radioeléctricas

(Cuestión UIT-R 201/3)

(1992-1994-1997-1999-2003-2005-2007)

…

Anexo 1

…

# 6 Exceso de longitud del trayecto radioeléctrico y sus variaciones

Como el índice de refracción troposférica es mayor que la unidad y varía en función de la altitud, una onda que se propaga entre el suelo y un satélite tiene una longitud de trayecto radioeléctrico que rebasa la longitud del trayecto geométrico. La diferencia de longitud se puede obtener con la siguiente integral:

 (15)

donde:

*s* : longitud del trayecto

*n* : índice de refracción

*A* y *B* : extremos del trayecto.

La ecuación (15) sólo se puede emplear si se conoce la variación del índice de refracción, *n*, a lo largo del trayecto.

Cuando no se conoce la temperatura, *T*, la presión atmosférica, *P*, y la humedad relativa, *H*, a nivel del suelo, el rebasamiento de la longitud de trayecto, *L*, puede calcularse utilizando el método semiempírico descrito más adelante, que se ha obtenido de los perfiles de sondeo radioeléctrico atmosférico suministrado por la campaña de mediciones realizada durante un año en 500 estaciones meteorológicas en 1979. En este método la expresión general del exceso de longitud de trayecto, *L*, viene dada por:

 (16)

donde:

0 : ángulo de elevación en el punto de observación

*LV* : rebasamiento vertical de la longitud del trayecto

*k* y  (0, *LV*) : términos correctivos para cuyo cálculo se utiliza el modelo atmosférico exponencial.

El factor *k* tiene en cuenta la variación del ángulo de elevación a lo largo del trayecto. El término  (0,  *LV*) expresa los efectos de la refracción (el trayecto no es una línea recta). Este término siempre es muy pequeño, salvo en ángulos de muy baja elevación, y se desprecia en el cálculo, pues entraña un error de sólo 3,5 cm para un ángulo 0 de 10 y de 0,1 mm para un ángulo 0 de 45°. Además, cabe observar que en ángulos de elevación muy bajos en los que el término  no sería despreciable, la hipótesis de una atmósfera estratificada plana, que constituye la base de todos los métodos de cálculo del exceso de longitud del trayecto, ya no es válida.

El exceso de longitud del trayecto vertical (m) viene dado por:

*LV*  0,00227 *P*  *f* (*T*) *H* (17)

En el primer término del segundo miembro de la ecuación (17), *P* es la presión atmosférica (hPa) en el punto de observación.

En el segundo término empírico, *H* es la humedad relativa (%); la función de la temperatura *f*(*T*) depende de la ubicación geográfica y viene dada por:

*f* (*T*)  *a* 10*bT* (18)

donde:

*T* se expresa en C

*a* en m/% de humedad relativa

*b* en C–1.

En el Cuadro 2 se indican los parámetros *a* y *b* de acuerdo con la ubicación geográfica.

CUADRO 2

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Ubicación | *a* (m/%) | *b* (C–1) |
| Zonas costeras (islas, o ubicaciones a menos de 10 km de la costa) | 5,5 × 10– 4 | 2,91 × 10–2 |
| Zonas ecuatoriales no costeras | 6,5 × 10– 4 | 2,73 × 10–2 |
| Todas las demás zonas | 7,3 × 10– 4 | 2,35 × 10–2 |

Para calcular el factor de corrección *k* de la ecuación (16) se supone una variación exponencial en función de la altura *h* del coíndice de refracción atmosférica *N*:

*N*(*h*)  *Ns* exp (– *h* / *h*0) (19)

donde *Ns* es el valor medio del coíndice de refracción en la superficie de la Tierra (véase la Recomendación UIT-R P.453), y *h*0 viene dado por:

 (20)

*k* se calcula entonces mediante la siguiente expresión:

 (21)

donde *ns* y *n*(*h*0) son los valores del índice de refracción en la superficie de la Tierra a la altura *h*0 (dada por la ecuación (20)) respectivamente, y *rs* y *r*(*h*0) son las distancias correspondientes al centro de la Tierra.

Para los trayectos Tierra-espacio con ángulos de elevación θ, el exceso de longitud del trayecto troposférico, *L*(), (m) se puede expresar como la suma de los componentes hidrostático y húmedo, *LH*()y*LW*().

El exceso de longitud del trayecto a lo largo de un trayecto vertical, *LHv* y *LWv* puede proyectarse al ángulo de elevación mayor de 3, utilizando dos funciones de correspondencia independientes para los componentes hidrostático y húmedo, *mH*() y *mW*():

  m (22)

El componente hidrostático vertical en la superficie de la Tierra, *LHvs*, puede calcularse del siguiente modo:

 m (22a)

El componente húmedo vertical en la superficie de la Tierra, *LWvs*, puede calcularse del siguiente modo:

 m (22b)

donde:

*ps*, *es*: presión total del aire y presión parcial del vapor de agua en la superficie de la Tierra (hPa)

*Tms*: temperatura media de la columna de vapor de agua por encima de la superficie (K)

: factor de reducción de la presión del vapor

*Rd*: *R*/*Md* = 287,0 (J/kg K)

*R*: constante molar de gas = 8,314 (J/mol K)

*Md*: masa molar de aire seco = 28,9644 (g/mol)

*k*1= 77,604 (K/hPa)

*k*2= 373 900 (K2/hPa)

*gms*= *gm*(*hs*)

*gm*(*h*)= 9,784 (1 – 0,00266 cos(2 *lat*) – 0,00028 *h*)

= aceleración de la gravedad en el centro de masa del aire desde la altura *h*(m/s2)

*lat*: latitud de la ubicación (radianes)

*hs*: altura de la superficie de la Tierra sobre el nivel medio del mar (s.n.m.m., km).

Para los receptores ubicados a una altura *h* (km) distinta de la altura *hs* de superficie, los componentes verticales hidrostático y húmedo, *LHv*(*h*) y *LWv*(*h*), vienen dados por:

 m (23a)

 m (23b)

donde:

Los valores de los parámetros meteorológicos de entrada a la altura *h*, *Tm*(*h*), *e*(*h*) y *p*(*h*), pueden calcularse a partir de los valores en la superficie de la Tierra, *Tms*, *es* y *ps*, utilizando las siguientes ecuaciones:

   K (24a)

 hPa (24b)

 hPa (24c)

donde:

*m*: gradiente de disminución térmica de la temperatura media del vapor de agua desde la superficie de la Tierra (K/km).

*T*s = temperatura del aire en la superficie de la Tierra (K) = 

α = gradiente de disminución térmica de la temperatura del aire (K/km)  

 = *Rd* /1000 = 0,287                J/(g K)

*g* = velocidad de descenso de la temperatura del aire (K/km) = 

Pueden obtenerse todos los valores de los parámetros del modelo, *ps*, *es*, *Tms*, λ, y α*m*, asumiendo que los parámetros meteorológicos se caracterizan por la fluctuación estacional:

 (25)

donde:

*Xi*: *ps*, *es*, *Tms*,  o *m*

Índice *i:* 1 indica *ps*, 2 indica *es*, 3 indica *Tms*, 4 indica *,* 5 indica α*m*

*a*1*i*: valor medio del parámetro

*a*2*i*: fluctuación estacional del parámetro

*a*3*i*: día del valor mínimo del parámetro

*Dy*:día del año (1, 2, ..., 365,25), 1 = 1 de enero, 32 = 1 de febrero, 60,25 = 1 de marzo.

Los coeficientes *a*1, *a*2 y *a*3 de los parámetros *ps*, *es*, *Tms*, λ, y α*m*, y la altura del nivel de referencia, *href* , a la que dichos coeficientes se han calculado, forman parte integral de la presente Recomendación y se encuentran disponibles con formato de mapas digitales en el fichero R-RECP.834-7-201504-I!!ZIP-E.

La longitud de los datos va de 0° a 360° y la latitud de +90° a –90°, siendo la resolución de 1,5° tanto en longitud como en latitud. El exceso de longitud del trayecto en cualquier posición que se desee y a cualquier altura sobre la superficie, *h*, puede calcularse con el método siguiente:

a) Determínense los coeficientes *a*1i, *a*2i y *a*3i, de los cinco parámetros, *ps*, *es*, *Tms*, λ, α*m*, y la altura de referencia, *href*, de los mapas en los cuatro puntos de la retícula más próximos a la posición deseada.

b) Calcúlense los valores de los cinco parámetros, *ps*, *es*, *Tms*, λ, y α*m*, a la altura de referencia, *href*, para el día del año *Dy*, , ,  y  y en los cuatro puntos de la retícula más próximos, mediante la ecuación (25) con los coeficientes *a*1i, *a*2i y *a*3i de cada punto de la retícula.

c) Calcúlense los valores de los tres parámetros, *p*(*h*), *e*(*h*) y *Tm*(*h*), a la altura *h* en los cuatro puntos de la retícula más próximos mediante las ecuaciones (24a), (24b) y (24c) con los valores , ,  y  , y con los valores de *href* correspondientes a cada punto de la retícula.

d) Calcúlense los valores de *LHv*(*h*) y *LWv*(*h*), a la altura *h* de los cuatro puntos de la retícula más próximos a la posición deseada, mediantes las ecuaciones (23a) y (23b) con los valores de *p*(*h*), *e*(*h*) y *Tm*(*h*) correspondientes a cada punto de la retícula.

e) Calcúlense los valores a la altura *h* de *LHv*(*h*) y *LWv*(*h*), en la posición deseada por interpolación bilineal de los cuatro valores de *LHv*(*h*) y *LWv*(*h*) en los cuatro puntos de la retícula descritos en la Recomendación UIT-R P.1144.

f) Calcúlese el valor del exceso de longitud del trayecto troposférico a la altura *h* en la posición deseada, *L*(*h,*), mediante la ecuación (22).

La exactitud del modelo propuesto ha sido probada utilizando mediciones por radiosonda, GNSS y radiométricas para determinar *L*vs, y la incertidumbre a nivel mundial se encuentra entre 2 y 6 cm. En aquellos casos en que se necesite una mayor precisión, podrán incorporarse al modelo mediciones locales de presión total del aire y presión del vapor de agua.

La función de correspondencia de los componentes hidrostático y húmedo, *mh*() and *mw*() viene dada por:

                 (26a)

                 (26b)

siendo:



*b*h = 0,0029

*b*w = 0,00146

*c*w = 0,04391

  (26c)

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Hemisferio | *c*1 | *c*10 | *c*11 | ψ |
| Norte | 0,062 | 0,001 | 0,005 | 0 |
| Sur | 0,062 | 0,002 | 0,007 | π |

 (26d)

 (26e)

Los coeficientes *A0h, A1h, A2h, B1h, B2h, A0w, A1w, A2w, B1w* y  *B2w,* forman parte integral de la presente Recomendación y se encuentran disponibles con formato de mapas digitales en el fichero R‑RECP.834-7-201504-I!!ZIP-E.ZIP. Los valores de los parámetros *ah* y *aw* en la posición deseada se calcularán por interpolación bilinealde los cuatro valores de estos coeficientes en los cuatro puntos de la retícula descritos en la Recomendación UIT-R P.1144.



En el caso de un enlace Tierra-espacio con ángulos de elevación, *θ*, mayores de 20°, las funciones de correspondencia dadas por (26a) y (26b) pueden aproximarse por:

                 (26f)

Al aplicar este modelo se recomienda utilizar o bien las ecuaciones (26a) y (26b) o bien la (26f) sistemáticamente en todos los ángulos de elevación.



# 7 Propagación por capas de conducción

Los conductos radioeléctricos existen cuando el gradiente vertical del coíndice de refracción a una altura y lugar dados es menor que –157 N/km.

La existencia de conductos es importante porque pueden originar una propagación anómala de las ondas radioeléctricas, especialmente en enlaces terrenales o enlaces Tierra-espacio de ángulo muy bajo. Los conductos proporcionan un mecanismo para que las señales radioeléctricas de frecuencias suficientemente altas se propaguen más allá de la distancia de visibilidad directa normal, causando posible interferencia con otros servicios (véase la Recomendación UIT-R P.452). Constituyen también un factor importante en la aparición de la interferencia debida a la propagación por trayectos múltiples (véase la Recomendación UIT-R P.530) aunque no son necesarios ni suficientes para la propagación por trayectos múltiples en un enlace determinado.

## 7.1 Influencia del ángulo de elevación

Cuando una antena transmisora está situada dentro de un conducto radioeléctrico estratificado horizontalmente, los rayos emitidos en ángulos de elevación muy rasantes pueden quedar «atrapados» dentro de los límites del conducto. Para el caso simplificado de un perfil de coíndice de refracción «normal» por encima de un conducto de superficie que tiene un gradiente de coíndice de refracción fijo, el ángulo de elevación crítico  (rad) para que los rayos sean guiados, viene dado por la siguiente expresión:

 (27)

donde d*M*/d*h* es el gradiente vertical del coíndice de refracción modificado  y  *h*, es el espesor del conducto, que es la altura del límite del conducto por encima de la antena transmisora.

En la Fig. 2 se indica el ángulo de elevación máximo para que los rayos sean guiados dentro del conducto. El ángulo máximo de propagación guiada aumenta rápidamente cuando los gradientes de coíndice de refracción disminuyen por debajo de –157 N/km (es decir, incremento de régimen de disminución térmica con la altura) y cuando aumenta el espesor del conducto.

## 7.2 Frecuencia mínima de la propagación por conductos

La existencia de un conducto, aunque esté situado convenientemente, no implica necesariamente que la energía se acoplará eficazmente al mismo de modo que se produzca una propagación a larga distancia. Además de satisfacer la condición de ángulo de elevación máximo indicada anteriormente, la frecuencia de la onda debe estar por encima de un valor crítico determinado por la profundidad física del conducto y por el perfil del coíndice de refracción. Por debajo de esta frecuencia mínima, las cantidades de energía cada vez mayores se fugarán a través de los límites del conducto.

La frecuencia mínima para que una onda pueda propagarse dentro de un conducto troposférico se puede estimar utilizando un método integral de fase. En la Fig. 3 se indica la frecuencia mínima para conductos en la superficie (curvas de trazo continuo) en los que se supone que un gradiente de coíndice de refracción (negativo) constante se extiende desde la superficie hasta una altura dada con un perfil normal por encima de esta altura. Para las frecuencias utilizadas en sistemas terrenales (típicamente 8-16 GHz), se requiere una capa de propagación guiada con un espesor mínimo de unos 5 a 15 m y en esos casos, la frecuencia de propagación mínima, *fmín*, que depende en gran medida del espesor del conducto y del gradiente de índice de refracción.

En el caso de conductos elevados, interviene un parámetro adicional aún para el caso simple de un perfil de coíndice de refracción lineal. Este parámetro se relaciona con la configuración del perfil de índice de refracción que está por debajo del gradiente de conducción. Las curvas de trazo interrumpido de la Fig. 3 muestran la frecuencia mínima de propagación guiada para una capa de conducción de gradiente constante que está por encima de una capa de superficie que tiene un gradiente de coíndice de refracción normal de – 40 N/km.

figura 2

Ángulo máximo de propagación guiada para un conducto de superficie de gradiente  
de coíndice constante sobre una Tierra esférica



Para capas que presentan velocidades de disminución de temperatura que sólo son ligeramente superiores que el mínimo requerido para que se produzca un conducto radioeléctrico, la frecuencia mínima de propagación guiada aumenta realmente por el conducto de superficie equivalente. Sin embargo, para gradientes de conducción muy intensos, la propagación guiada por un conducto elevado requiere una capa mucho más delgada que un conducto de superficie de igual gradiente para cualquier frecuencia dada.

figura 3

Frecuencia mínima de propagación guiada para conductos radioeléctricos  
atmosféricos de gradiente de coíndice constante



\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_